

RESUME

Les nappes d'eau phréatiques, facilement accessibles, sont les réserves les plus sollicitées dans les régions tropicales sèches. Une étude de leurs interactions avec les eaux de surface a été entreprise conjointement par le département des eaux continentales de l'ORSTOM - Dakar et le laboratoire d'hydrogéologie de l'université Cheikh Anta Diop. Cet article présente les principaux résultats obtenus dans le Sine - Saloum (Sénégal).

La nappe phréatique est contenue dans les formations argilo-sableuses du continental terminal. Sa profondeur augmente considérablement du bas-fond marécageux vers les zones de plateau. La surface piézométrique épouse les formes de la vallée. Les lignes de courant indiquent un écoulement radial convergeant vers la rivière. Pendant la saison de pluie (juillet à octobre), la nappe emmagasine importante quantité d'eau avec une vitesse d'infiltration d'environ 5 m/j. Au cours de la longue saison sèche (novembre à juin), la réserve souterraine régulatrice s'amenuise progressivement pour s'annuler à la fin de la saison.

Le bilan de l'hydrosystème montre deux sources de vidange de la nappe superficielle :

- la résurgence sur les berges commence au milieu de la saison de pluie et se poursuit pendant la saison sèche. Elle draine annuellement 4 à 12 % de la réserve.
 - la reprise évaporatoire, épisodique pendant la saison de pluie et continue en saison sèche, est le principal facteur d'épuisement de la réserve en eau du bassin. Elle reprend annuellement environ 90 % de la masse d'eau emmagasinée.
- Aussi les mouvements d'eau sont dominés par des transferts verticaux entre la nappe et l'atmosphère, conditionnés par le degré hygrométrique de l'air.

Mots clés :

bassin versant, Néma, écoulement de surface, écoulement souterrain, nappe phréatique, pluviométrie, piézométrie, bilan hydrologique.

CARACTERISATION DES RELATIONS EAUX DE SURFACE - EAUX SOUTERRAINES EN MILIEU TROPICAL SEC : EXEMPLE DU BASSIN DE LA NEMA (SINE SALOUM, SENEGAL).

ABSTRACT

Underground water which is easily accessible is highly needed in dry tropical regions. A study of their interactions with surface water has been undertaken jointly by the Continental Water Department of ORSTOM - Dakar and the Hydrogeology Laboratory of Cheikh Anta Diop University. This article presents the main results obtained in Sine-Saloum (Senegal).

The ground water is contained in clayey and sandy structures of the continental terminal. Its depth considerably increases from the swampy low land towards the plateau zones. The piezometric surface takes the form of the valley. Current lines indicate a radial flow converging to the river.

During the rainy season (July to October) the water table stores an important quantity of water with an infiltration speed accounting for 5m/day approximately. In the course of the long dry season (November to June) the underground reserve decreases gradually and dries up at the end of the season.

The report on the hydro system shows two sources of draining of the surface water :

- resurgence on the banks starts in the middle of the rainy season and occurs until the dry season. It drains 4 to 12% of the reserve annually ;
- episodic evaporation phenomena during both seasons (rainy and dry) are the main factors of depletion of the water reserve in the basin. They annually take about 90% of the quantity of water stored.

Besides, water flows are dominated by vertical transfers between the phreatic water and the atmosphere and conditioned by the degree of air moisture.

Key words :

Watershed, Nema, Surface flow, Underground flow, Ground water, Rainfall, Piezometry, Hydrological report.

Gaston LIENOU

Daniel SIGHOMNOU

Luc SIGHA NKAMDJOU

Institut de Recherches Géologiques et Minières/Centre de Recherches hydrologiques (IRGM/CRH)

B.P. 4110 Yaoundé - Cameroun

Raymond MALOU

Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheik Anta Diop de Dakar

Jean Luc SAOS

IDR/ORSTOM Guinée B.P. 1984 Conakry

INTRODUCTION

Le Sénégal est l'un des pays du Sahel où le caractère temporaire des eaux de surface oblige les populations à s'intéresser aux nappes d'eau souterraines. Les plus sollicitées sont les nappes phréatiques, facilement accessibles, surtout en milieu rural.

Les travaux de saos et al. (1987), malou et al. (1991), malou (1992) et Malou et al. (1997) ont permis d'établir un modèle de fonctionnement de la nappe superficielle, dans le bassin versant de Baïla (basse Cassamance, Sénégal), à partir des précipitations, de l'évaporation Piche et de l'épaisseur de la zone non saturée.

Il a été envisagé la généralisation de ce modèle sur un transect sud-nord, suivant un gradient de précipitations décroissant. Pour cela, deux sites supplémentaires ont été choisis : Sine Saloum (bassin versant de la Néma) et vallée du fleuve Sénégal (cuvette de Nianga).

Le présent article traite des données hydroclimatologiques et hydrogéologiques recueillies dans le bassin versant de la Néma (13° 42' et 13° 45' Nord ; 16° 22' et 16° 29' Sud) au cours des années hydrologiques 1993/1994 et 1994/1995. Trois stations de mesures sont équipées chacun d'un

pluviographe couplé à un système d'enregistrement continu des variations du niveau de la nappe, qui permet d'identifier les pluies efficaces, de déterminer le temps de réponse et la vitesse d'infiltration des eaux de pluie. L'ampleur des échanges entre les pluies, la nappe phréatique et la rivière est discernée sur le bilan hydrologique. Au niveau local, les résultats constitueront les paramètres d'entrée pour le modèle dans le biotope du Sine Saloum.

Tableau I : Caractéristiques du bassin versant de la Néma

Périmètre (P)	31 km	
Indice de forme (K_C)	1.23	
Rectangle équivalent	Longueur (L)	11 km
	Largeur (l)	4.5 km
Altitude maximale	45 m	
Altitude minimale	2 m	
Indice de Roche (I_p)	0.065	

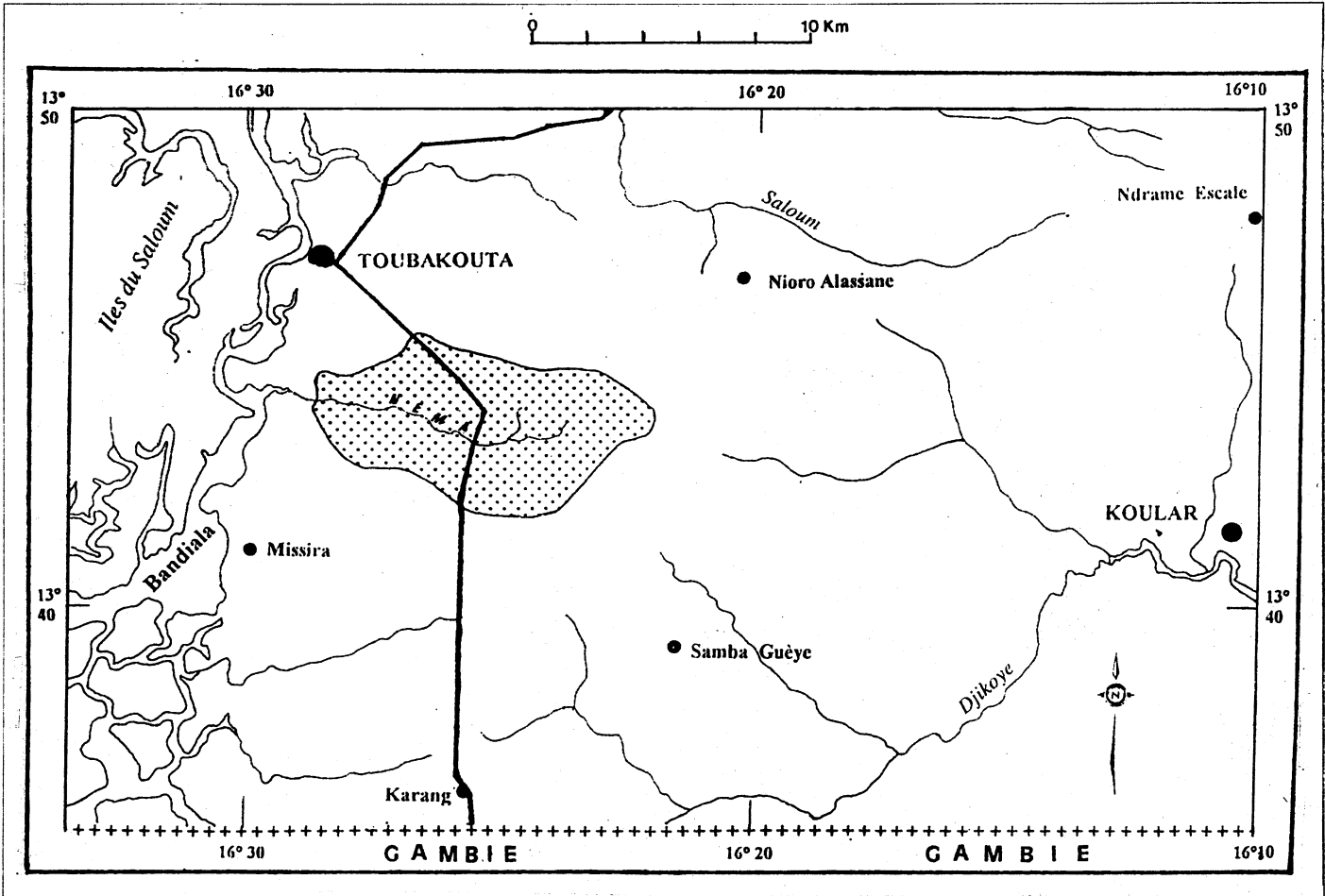


Figure 1 : Carte de situation

I. MILIEU PHYSIQUE ET CONTEXTE CLIMATIQUE

1.1. milieu physique

La région naturelle du Sine - Saloum (Sénégal), notamment sa partie méridionale, est limitée au sud par la République de Gambie, au nord par le fleuve Saloum et à l'ouest par l'océan Atlantique. Le modelé de la région est caractérisé par la présence de vallées qui se sont creusées pendant le quaternai-

re grâce aux changements climatiques (Michel P., 1973). Les sols sablo-limoneux, très filtrant (SCET, 1966), occupent les parties hautes des vallées. Ces sols sont constamment ou temporairement gorgés d'eau, dans les bas-fonds, à cause de l'affleurement de la nappe phréatique. L'écoulement des eaux continentales n'aboutit que très rarement à la mer, il s'effectue sous forme endoréique dans les bassins fermés.

La Néma, elle, se jette exception-

nellement à la mer par l'intermédiaire du Bandiala, bras de mer du Saloum (fig.1). Des cartes IGN au 1/50000 ont été utilisées pour la détermination des caractéristiques de son bassin versant (tableau I).

Situé à 5 km environ au sud de la ville de Toubakouta, ce bassin occupe une superficie de 50 km². Il est allongé et assez compacte ; ce qui permet une concentration rapide des eaux dans le talweg et explique les crues souvent violentes et de courte durée.

1.2. contexte climatique

Le bassin de la Néma fait partie de la région climatique de la petite côte, variante littorale de celle du Boundou qui la limite à l'est et qui a un climat typiquement soudanien. Elle est caractérisée par deux saisons déterminées par les déplacements des masses d'air tropicales:

- la saison des pluies : de juin à octobre, au cours de laquelle la région est parcourue par la mousson, vent chaud et humide générateur de précipitations, issu de l'anticyclone Sainte Hélène ;

- la saison sèche : de novembre à mai, au cours de laquelle souffle l'alizé maritime, vent humide non générateur de précipitations, provenant de l'anticyclone des Açores et l'Harmattan, vent sec issu de la cellule anticyclonique magrébine.

Les températures sont en permanence élevées (28° C en moyenne annuelle). Le début tardif de la sai-

son de pluie explique le report en juin du maximum thermique. L'abondance des précipitations entraîne une baisse des températures au mois d'août.

La région du Sine Saloum, comme toute la zone tropicale a subi les effets néfastes de la période déficitaire qui dure depuis le début de la décennie 70 (Olivry, 1983 ; 1987; Mahe, 1993). Cette sécheresse a fait baisser la moyenne pluviométrique annuelle de 950 mm (période humide, avant 1968) à 700 mm (période sèche, de 1968 à l'actuelle), soit un déficit de 27 % à la station de Toubakouta (Lienou, 1996). Les observations pluviométriques dans le bassin de la Néma sont très récentes. La pluviométrie moyenne pour les deux années d'étude, calculée par la méthode de Thiessen corrobore le contexte de sécheresse actuelle. Elle est de 700 mm en 1993 et 900 mm en 1994. Ce qui donne des déficits respectifs de 27 % et de 5 % par rapport à la moyenne annuelle de la période humide (950 mm), calculée à la station de

Toubakouta. Les précipitations sont réparties entre juin et septembre. Les mois de juillet, août et septembre reçoivent plus de 90 % du total des précipitations annuelles alors que ceux de juin et octobre en reçoivent moins de 10 %. A l'échelle journalière, l'irrégularité des averses divise l'hivernage en une succession d'épisodes pluvieux séparés par des séquences sèches plus ou moins longues.

Une analyse statistique des pluies journalières à la station de Toubakouta donne une hauteur de précipitation décennale de 133 mm. Ce chiffre est comparable à celui de 130 mm lu sur la carte des précipitations journalières de fréquence décennale en Afrique de l'ouest (Y. Brunet - Moret, 1968).

II. HYDROGEOLOGIE DU BASSIN DE LA NEMA

Dans le bassin versant de la Néma, la nappe phréatique est contenue dans les formations du continental terminal constituées de dépôts

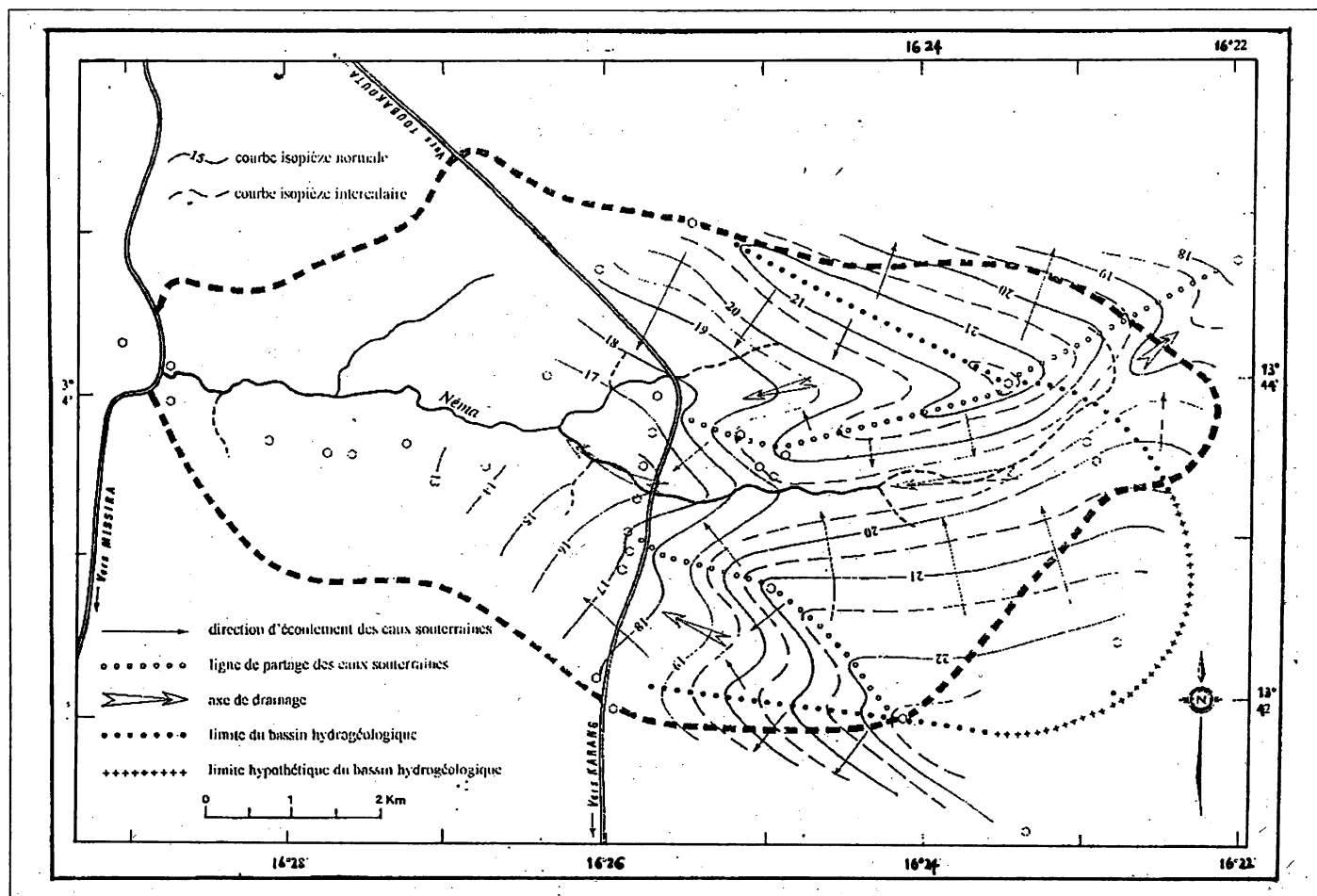


Figure 2 : Carte piézométrique de la nappe superficielle dans le bassin de la Néma

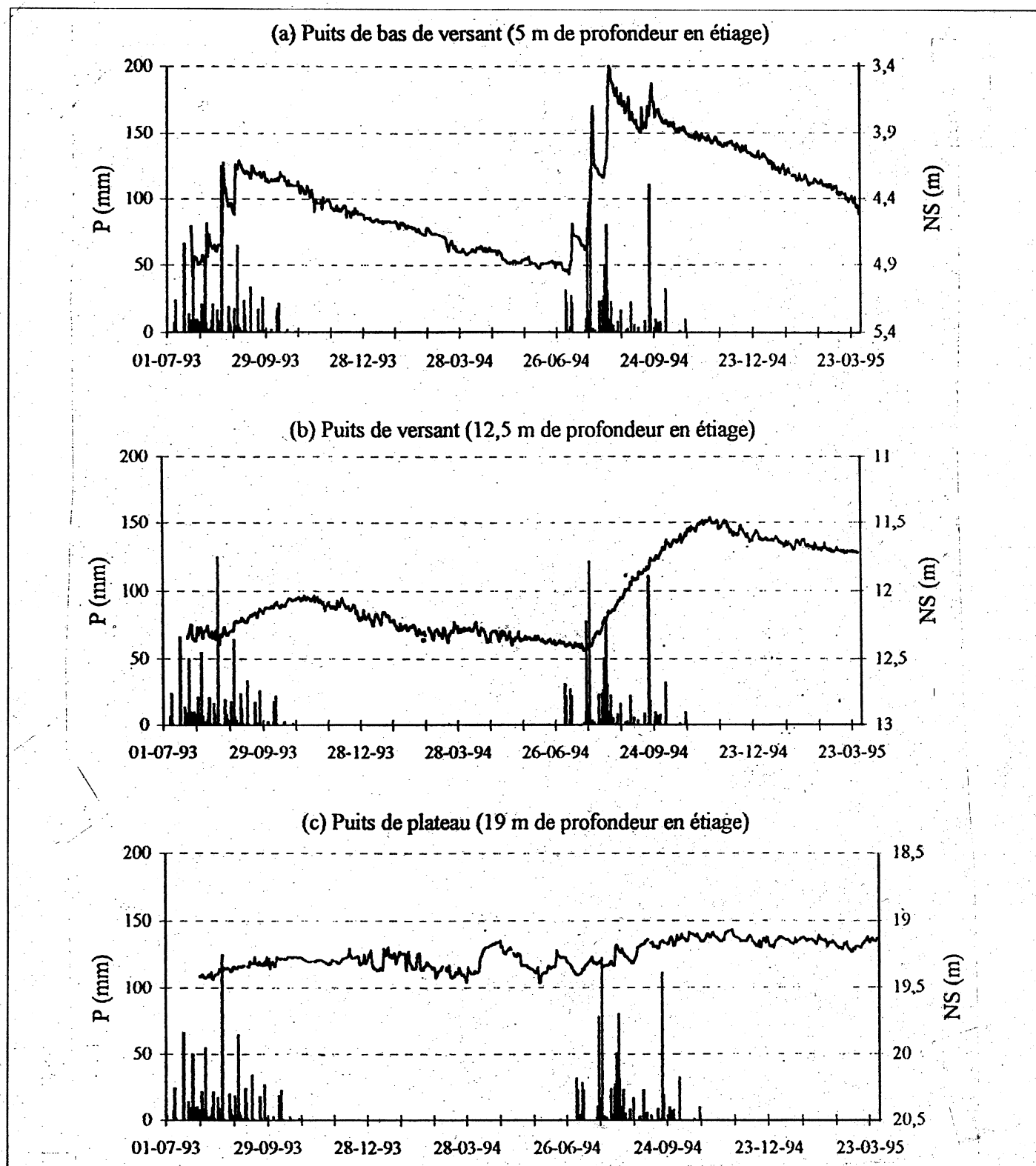


Figure 3 : Pluviométrie et évolution de la nappe phréatique (P: Pluviométrie; NS : Profondeur de la nappe)

détritiques hétérogènes d'âge miocène moyen à quaternaire (Lapartient, 1985). Ces dépôts ont une perméabilité de 10^{-5} m.s⁻¹ et un emmagasinement de 5 % (Diluca, 1976).

Ils reposent sur un substratum marneux, localement calcaire dont le toit a été érodé après la régression fini-éocène.

Le niveau de la nappe phréatique est suivi à travers un réseau de piézomètres et de puits. Tous les points d'observation ont été rattachés au nivellement national. La figure 2 présente une carte des isopièzes de cette nappe.

La forme générale de la surface piézométrique est concave, montrant une nappe radiale à lignes de cou-

rant convergente vers l'axe du cours d'eau qui la draine. Les cartes périodiques (de crue et d'étiage) montrent une stabilité de cet écoulement toujours axé sur le cours d'eau (Lienou up cit).

Cette nappe a été suivie depuis mai 1993. Les différents chronogrammes des points d'observation (fig. 3) montrent que les variations du

niveau de la nappe sont étroitement liées au cycle des précipitations.

Dans les puits peu profonds (fig. 3.a), ces variations sont rapides et fortes : lorsque le déficit hydrique du sol est satisfait, la recharge de la nappe se manifeste le même jour que l'averse génératrice. En tenant compte de la profondeur de la nappe et du temps qui sépare la remontée et l'averse, la vitesse moyenne d'infiltration est de l'ordre de 5 m.j-1. Elle est corroborée par la forte perméabilité (5.10-4 m.s-1) des formations (SCET, 1966).

Au cours de la saison sèche, la décrue présente une pente régulière. Le rabattement moyen de la nappe est de 5 mm.j-1. En assimilant le bassin hydrogéologique au bassin hydrologique (fig. 2), nous avons calculé le volume d'eau correspondant à ce rabattement par la formule :

$$V = S \times A \times dh$$

V : volume d'eau libéré,

S : coefficient d'enmagasinement de l'aquifère,

nalier de l'ordre de 125.102 m³ qui représente en effet une perte spécifique de 250 m³/km².j-1. La définition des conditions aux limites de l'aquifère, marquées par la ligne de partage des eaux souterraines montre que le cours d'eau commande les écoulements souterrains. La décharge de la nappe ne serait alors imputable qu'à la reprise évaporatoire et à l'écoulement de surface (drainage).

Dans les puits moyennement profonds (12 à 13 m) (fig. 3.b), la recharge est nettement déphasée par rapport aux pluies. Le déphasage est d'environ 2 mois en 1993 et 1 mois en 1994. Ce retard serait dû au temps de transfert des fronts de percolation générés à la surface par les événements pluvieux successifs. Le temps que met un front de percolation pour atteindre la nappe est proportionnel à l'épaisseur de la zone non saturée et aux forces de rétention auxquelles il y est soumis (Dupriez & De leener, 1990; Malou, 1992).

Dans les puits profonds (19 à 20 m)

moins, entre sept.93 et mars 95, le niveau piézométrique a subi une remontée très progressive qui a atteint 20 cm.

A l'échelle annuelle, il y a une nette relation entre la remontée piézométrique et la pluie cumulée. Dans le puits de bas de versant où les variations sont mieux appréciées, la remontée piézométrique est de 0.0 m en 1993 pour 735.4 mm de pluie alors qu'en 1994 elle est de 0.54 m pour 896.64 mm de pluie.

III. HYDROLOGIE DU BASSIN VERSANT DE LA NEMA

Le régime de la Néma est caractérisé par la succession de périodes de hautes et de basses eaux (fig. 4). Les périodes de crues, très courtes, se produisent en plein été, de juillet à début octobre. La saison de basses eaux débute en décembre et s'achève au début de saison suivante (juin ou juillet). Pendant la période de hautes eaux, le ruissellement est intermittent sous forme de pointes de crue correspondant aux grandes averses.

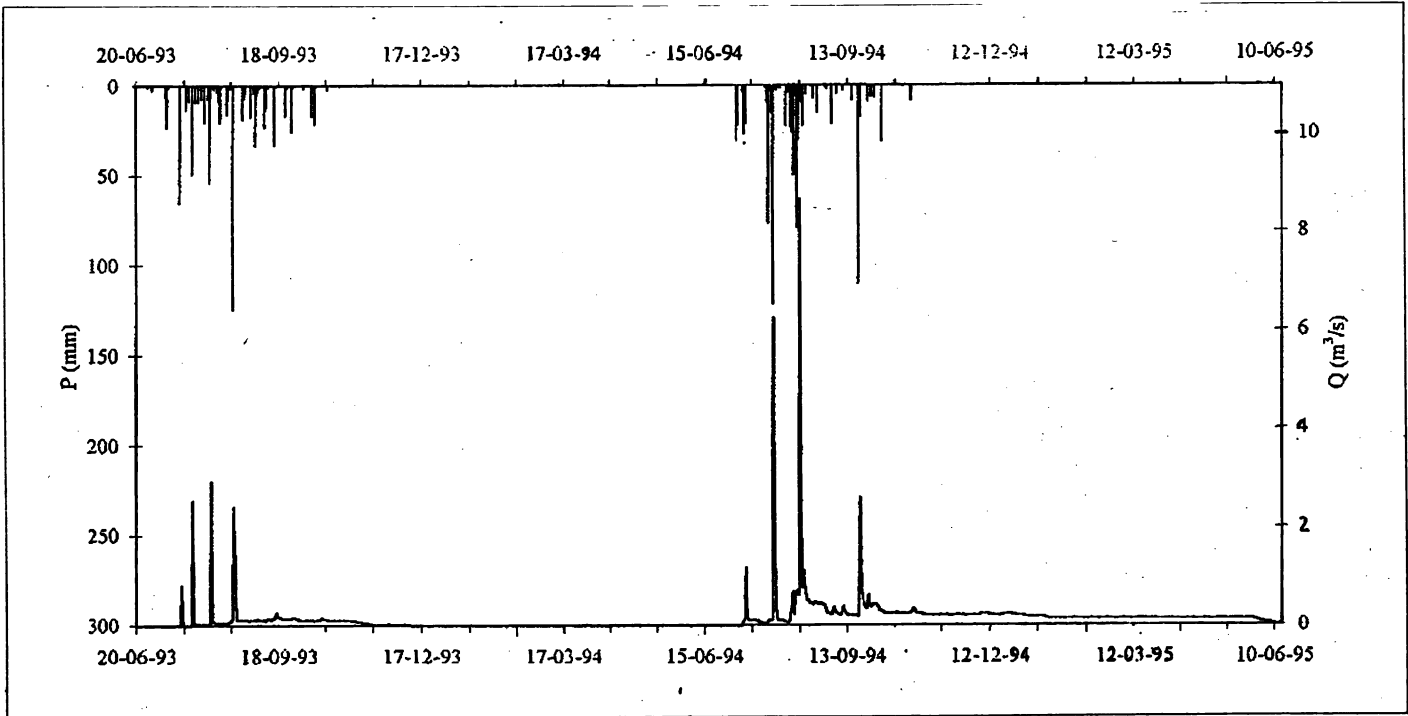


Figure 4 : Débits et précipitations journaliers de la Néma à Néma Ba (de juin 1993 à juin 1995)

A : surface du bassin hydrogéologique (sensiblement égale à celle du bassin hydrologique),
dh : rabattement de la surface piézométrique.

Le résultat donne un volume jour-

(fig. 3.c), il devient assez difficile de définir le cycle de variations saisonnières du niveau piézométrique. Son évolution est beaucoup plus marquée par des variations journalières dues à l'exploitation. Néan-

Le niveau de base de l'hydrogramme annuel s'élève progressivement à partir du milieu de la saison de pluies au moment où la remontée du niveau de la nappe permet une résurgence dans la vallée (écoule-

ment de base). Cet écoulement se prolonge généralement au-delà de la saison des pluies. Le débit de base a été moins important et s'est annulé très tôt (décembre) en 1993 alors qu'il a été plus substantiel, couvrant toute la saison sèche en 1994. Ceci corrobore les remontées piézométriques décrites précédemment.

En absence de toute précipitation, le débit mesuré à l'exutoire du bassin (Néma Ba) est issu de la nappe souterraine. Il est estimé à 15 l/s en 1994, soit un volume journalier d'environ 1300 m³ qui, rapporté à la superficie du bassin donne un volume spécifique journalier de 26 m³/km². Connaissant le volume d'eau libéré en un jour par la nappe (250 m³/km²), nous avons estimé la part de l'évaporation à 224 m³/km², soit 90 % des pertes totales. Ceci montre la prépondérance de la reprise évaporatoire, qui constitue de ce fait le véritable facteur de la décharge des nappes d'eau superficielles en zone sahélienne.

L'établissement d'un bilan hydrologique passe par la séparation des différentes formes d'écoulement que Chevallier (1990) appelle "chemins de l'eau" et qu'on peut assimiler à celles décrites par Roche (1963). Cet auteur définit sur un bassin perméable trois formes d'écoulement :

- l'écoulement de base provenant des réserves souterraines ou superficielles (réservoirs, mares, une partie du volume d'eau contenu dans le lit du cours d'eau etc.),
- le ruissellement superficiel qui coule à la surface du sol lors des précipitations efficaces,
- l'écoulement intermédiaire dont les mécanismes ne sont pas encore bien compris. Cela explique la grande variété de terminologie employée. Dunne (1983) l'appelle écoulement rapide de subsurface (subsurface storm flow); Kirkby (1988) préfère le terme d'écoulement rapide interne (through flow). Dans tous les cas, il s'agit d'un écoulement oblique à faible distance de la surface du sol qui participe au gonflement de la crue.

Ajoutons avec Dunne T. (1983) et Chevallier P. (1990) une quatrième forme assez fréquente en régions tropicales humides: C'est un écoulement sur surface de sol saturé. Cet écoulement apparaît et se développe lorsque les sols deviennent saturés en surface avec la remontée de la nappe jusqu'à affleurement. Lors des événements pluvieux, il apparaît sur les bas de versants concaves à fond large et pente douce.

Sur les courbes de décrue on distingue, une variation rapide de débit correspondant au ruissellement superficiel, en fin de décrue une variation lente de débit, c'est l'écoulement de base, et entre les deux un écoulement hypodermique ou ruissellement retardé.

Dans l'établissement du bilan, nous assimilerons ruissellement superficiel et écoulement retardé à un seul terme que nous appellerons ruissellement.

L'évaluation des termes du bilan se doit d'être faite en années hydrologiques d'après Roche (1986)¹. Le tableau II récapitule les principaux termes du bilan hydrique dans le bassin versant de la Néma.

La figure 5 présente ce bilan hydrologique sur le bassin de la Néma pour la période d'étude sous forme de camembert.

Tableau II : Bilan hydrologique annuel sur le bassin de la Néma (en mm) : précipitations P. ; écoulement E. ; écoulement de base Eb. ; ruissellement R. ; évapotranspiration potentielle de Penman ETP(Penman) ; déficit d'écoulement P - E

Années	P.	E.		ETP _(penman)	P - E
		Eb.	R.		
1993-1994	735.4	26.1	17.81	1590.4	691.49
1994-1995	896.64	103.8	59.2	1593.41	733.64

Le camembert complet représente l'apport annuel des précipitations. Nous y avons découpé deux parts qui constituent l'ensemble du volume écoulé (E = R + Eb), R représentant le volume des crues (ruissellement) et Eb le volume de résurgen-

ce des eaux souterraines dans la vallée (écoulement de base). Le déficit d'écoulement (P - E) est la quantité d'eau qui est tombée sur le bassin versant et qui n'a pas participé à l'écoulement.

Ce bilan montre clairement la faible part de l'écoulement au regard des apports par les précipitations et la part encore plus faible de l'écoulement rapide. Si l'on assimile le déficit d'écoulement à l'évaporation réelle et au stockage souterrain, on constate qu'il représente 80 à 90 % des apports par précipitations. Compte tenu de la faiblesse du stockage souterrain, 0.0 m et 0.54 m respectivement en 1993/1994 et 1994/1995, nous pouvons dire que la reprise évaporatoire est le facteur déterminant de la décharge de la nappe superficielle.

II. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Dans le bassin de la Néma (Sine - Saloum, Sénégal), de toutes les observations que nous avons faites, se dégagent trois caractéristiques majeures concernant les fonctions de transfert hydrique entre les eaux de surface et les eaux souterraines :

- la nappe se recharge considérablement pendant la saison de pluie. Le temps de réponse est proportionnel à l'épaisseur de la zone non saturée. La vitesse d'infiltration est de 5 m/j ;
- la masse d'eau qui contribue au gonflement des eaux souterraines en hivernage tarit ensuite progres-

¹ L'année hydrologique correspond au cycle annuel de variation des débits, elle est découpée dans l'année calendaire de manière à ce que les réserves du bassin soient minimales au début et à la fin de la période choisie.

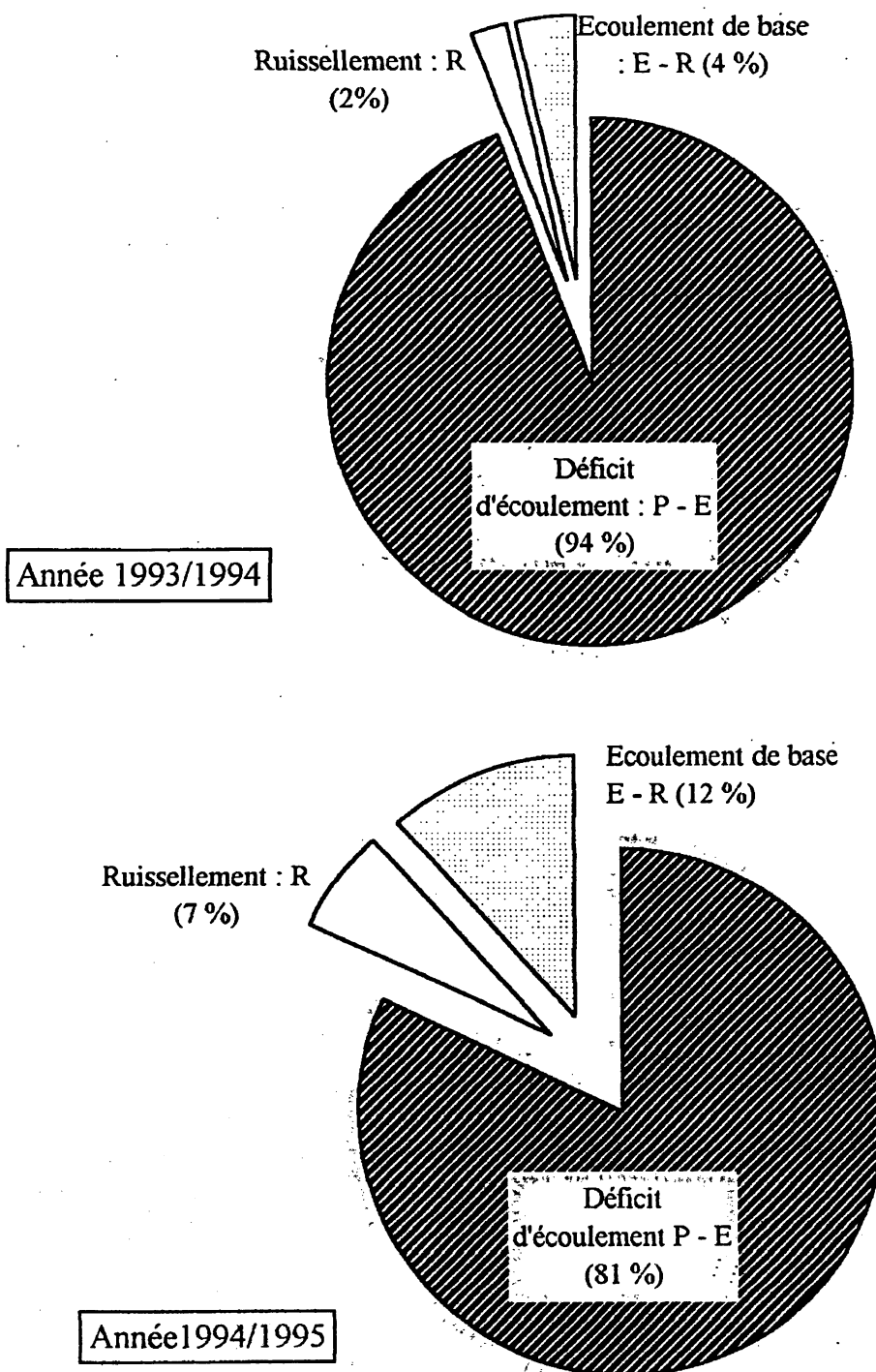


Figure 5 : Bilan hydrologique annuel sur le bassin versant de la Néma

sivement pendant la longue saison sèche. La baisse moyenne du niveau piézométrique est de 5 mm/j. On obtient à la fin de l'année hydrologique un stockage souterrain infime ou nul ;

- les mesures de débit réalisées dans la rivière montrent une réelle participation de l'écoulement de base, dû à la résurgence des eaux souterraines, au gonflement de l'hydrogramme annuel. Elle repré-

sente environ 60 % du volume annuel écoulé.

Le bilan hydrologique indique un déficit d'écoulement de l'ordre de 80 à 90 % des précipitations. La décharge de la nappe calculée par la méthode piézométrique est de 250 m³/km²/j alors que la quantité d'eau perdue par écoulement latéral (résurgence) n'est que de 26 m³/km²/j. La part de la reprise éva-

poratoire est estimée à 224 m³/km²/j. Ces résultats montrent que les transferts hydriques dans le bassin de la Néma sont dominés par des échanges verticaux entre l'atmosphère et la nappe phréatique, déterminées par le degré hygrométrique de l'atmosphère. □

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRUNET - MORET Y.**, 1968 - Etude générale des des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. Rapport de synthèse. CEIH - ORSTOM.
- CHEVALLIER P.**, 1990 - Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide. Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Série études et thèses. ORSTOM.
- DILUCA C.**, 1976 - Etude hydrogéologique du continental terminal entre le Sine et la Gambie; 2ème phase et rapport de synthèse. - Rapport B.R.G.M. Dakar. 76 Dak 02 - 33 p. Multigr.
- DUNNE T.**, 1983 - Field studies of hillslope flow processes. In J. Kirkby. Editor of hillslope hydrology. John Wiley & Sons: 227 - 293.
- DUPRIEZ H. & DE LEENER P.**, 1990 - Les chemins de l'eau. Ruissellement, Irrigation, drainage (manuel tropical). Terres et vie, CTA, L'harmattan et ENDA. Belgique, 380 p.
- KIRKBY M.**, 1998 - Hillslope runoff processes and models. J. Hydrol., 100: 315 - 339.
- LAPARTIENT**, 1985 - Le " Continental Terminal " et le Pleistocène ancien du bassin Sénégal-Mauritanien. Stratigraphie, sédimentologie, diagenèse, altération. Reconstitution des paléorivages au travers des cuirasses. Thèse de doctorat d'état fac. sci. tech., Univ. Dr. Eco. Sci. d'Aix Marseille.
- LIENOU G.**, 1996 - Relations écoulements de surface - écoulements souterrains dans le bassins de la Néma (Sine - Saloum, Sénégal) - Rapport de DEA. Géol. App. UCAD.
- MALOU R.**, 1992 - Etude des aquifères superficiels en Basse Casamance: Un modèle de bilan hydrique. Thèse de 3ème cycle. Dépar Géol., fac. Sci. UCAD.
- MALOU R., SAOS J. L., FAYE S., DIENE M.**, 1997 - Le flux net : un modèle de simulation des fluctuations piézométriques en zones climatiques déficitaires. Vème assem. Scien. de l'assoc. Inter. des scien. Hydro. ; 23 avr. Au 3 mai 1997 ; Rabat, Maroc
- MICHEL P.**, 1973 - Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mém. ORSTOM. N° 63 - 3 tomes - 752 p. Paris.
- ROCHE M.**, 1963 - Hydrologie de surface. GAUTHIER - VILLARS, ORSTOM, paris. 430 p.
- ROCHE (M.)**, 1986 - Dictionnaire français d'hydrologie de surface. MASSON, paris, 288 p.
- SAOS J. L., DACOSTA H., LETROQUER Y., OLIVRY J. C.**, 1987 - Le marigot de Baïla (Basse Casamance) : Pluviométrie et écoulement. Résultat des campagnes 1983, 1984, 1986.
- SCET.**, 1996 - Aménagement des vallées du bas Sine Saloum. Etude Pédologique. Vallée de la Néma. Dakar - 15 P. Multigr.